

Agradecimientos

Sin el esfuerzo de los demás miembros que colaboran y han colaborado en el Laboratorio, éste no existiría: Antonio Sáenz, Juan Cormenzana, Sergio Morezuelas, Paco Hevia, Salvador León, Jorge Ramírez, Diego Sanz, Antonio Ledda, Pablo de Hoyos, Carlos de Miguel, Isabel Domarco, Oscar García Pascua, Cristina Gallego, Dr. Oscar Ahumada y Concepción Pulido (por orden de aparición en el mismo).

Bibliografía

Ashcroft, N. W., N. D. Mermin, Solid State Physics, Saunders College Publishing, Orlando (1976)

Doi, M., S. F. Edwards, The theory of Polymer Dynamics, Oxford University Press, Oxford (1986)

Gresho, P.M., and R. L. Sani, Incompressible Flow and the Finite Element Method, John Wiley & Sons, Chichester (1998)

Hockney, R. W. and J. W. Eastwood, Computer Simulation using Particles, McGraw-Hill, New York (1981)

Pedersen, J. S., Laso, M., Schurtenberger, P., Phys. Rev. E 54(6) pp. 5917-5920 (1996)

Laso, M., Cormenzana, J.L. "Computational Techniques For Smart Materials" in "Encyclopedia of Smart Materials", J. Harvey Ed., John Wiley & Sons, New York, in press (2000)

Nye, J. F. Physical Properties of Crystals, Oxford University Press, Oxford (1995)

Otsuka, K., Wayman, C. M., eds., "Shape Memory Materials", Cambridge University Press, New York (1998)

Reichl, L. E., A Modern Course in Statistical Physics, University of Texas Press, Austin (1980)

Modelos Numéricos

Para el Estudio de Ventilación en Túneles

P. Retana
Institute Français du Petrole (IFP)

Proyectos de la Escuela

I. Del Rey
Centro de Modelado
en Ingeniería Mecánica (CEMIM)

A. Fraile
E. Alarcón
ETS Ingenieros Industriales.
Universidad Politécnica de Madrid

Introducción y objetivos

La nueva red de carreteras es uno de los factores básicos de cohesión entre los países de la Unión Europea. Las estrictas condiciones impuestas en su proyecto para favorecer la rápida distribución de personas y bienes, tienen una gran influencia en la construcción de túneles mayores y más largos que, además, sufren el paso de un número de vehículos en continuo crecimiento.

Este aumento de tráfico se ve acompañado por una demanda de confort y seguridad especialmente en lo que se refiere a la ventilación necesaria para mantener controlada la contaminación en el interior del túnel así como en las precauciones que deben establecerse para limitar el daño y las muertes que puedan surgir durante el desarrollo de un incendio dentro del túnel.

La tendencia actual en sistemas de ventilación está encaminada a la implantación de sistemas longitudinales incluso para grandes longitudes, debido fundamentalmente al menor coste de construcción al no tener que disponer conductos auxiliares y la facilidad de ampliación si es necesario aumentar el empuje instalado. Sin embargo en caso de incendio, el humo no tiene posibilidad de ser evacuado como ocurriría en un sistema de extracción mediante trampillas u otros elementos análogos.

En estas circunstancias la situación de túnel con doble sentido de circulación se presenta como especialmente dramática al no poder impulsar el humo aguas abajo del incendio. En estos casos la actuación se centra en mantener el humo confinado el tiempo suficiente para que los usuarios escapen, para lo cual se opera desde los ventiladores más alejados al incendio. En efecto, la actuación desde aceleradores próximos crearía turbulencias capaces de romper la estratificación de la capa caliente dando una situación más desfavorable para el escape de las personas.

Sin embargo en una situación real donde hay vehículos circulando, ventiladores conectados, unas determinadas condiciones atmosféricas exteriores, etc., no es fácil saber cómo actuar para lograr confinar o dirigir los humos; a esto se une que el equipo de control aun siendo personal especializado tiene que actuar en condiciones de emergencia por lo que las decisiones han de estar claramente predeterminadas en función de variables que aporta la instrumentación instalada en el túnel (velocidad del aire en el interior, número de vehículos circulando,...). Es interesante contar con un sistema de control informatizado que evite los errores humanos. Estas decisiones sólo pueden ser fijadas después de estudiar multitud de escenarios de accidente para lo que es necesario establecer modelos numéricos que permitan la interpretación.

Modelo Unidimensional

Este modelo mantiene un nivel de simplicidad que permite su uso para el análisis general del fenómeno así como una interpretación de éste en términos de variables macroscópicas controlables y utilizables incluso en términos de dimensionamiento.

El bajo coste operacional de este modelo permite realizar multitud de estudios y sus resultados pueden ser utilizados para imponer condiciones de contorno en modelizaciones más complejas.

Este método supone que toda la sección transversal se encuentra en las mismas condiciones, lo que es claramente irreal en las proximidades del foco donde los gases calientes por flotación tienden a situarse bajo la bóveda o el falso techo del túnel permitiendo una zona con aire respirable a la altura de las personas si se consigue mantener la estratificación. En este sentido cabe considerar que los resultados serán conservadores. Por otra parte, al perder los detalles en la sección transversal no se observan ciertos fenómenos como por ejemplo las recirculaciones de la capa caliente, pero en cambio, permite el seguimiento del frente del humo y su acoplamiento con el comportamiento del tráfico.

En el modelo se supone que los efectos de la compresibilidad del aire pueden despreciarse y se combinan las ecuaciones del movimiento para cada sección suponiendo la continuidad de la presión y el caudal. Así el movimiento de la columna de aire se describe mediante la ecuación de equilibrio:

$$\frac{\partial W(t)}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Sigma \Delta p(t)}{L}$$

donde $W(t)$ es la velocidad de la masa de aire en el interior del túnel en cada instante de tiempo y $\Sigma \Delta p(t)$ aúna el conjunto de efectos presentes: pérdidas por fricción y singularidades del conducto; efecto émbolo de los vehículos que circulan por el interior del túnel; presión que suministran los equipos de ventilación; efecto chimenea inducido al elevarse la temperatura media en el interior del túnel; efectos del viento y diferencias de presión entre bocas.

El proceso numérico resuelve la ecuación anterior acoplándola con la ecuación de conservación de energía que permite obtener la evolución de las temperaturas. El incendio se modeliza como una fuente de calor puntual y el transporte de energía se produce en dirección longitudinal teniendo en cuenta el gasto másico de aire que circula y el calor que por convección y radiación se disipa por el revestimiento del túnel.

$$Q_{\text{muro}} = \frac{\Delta x}{\delta} (\alpha [T - T_{\text{muro}}] + \epsilon \sigma [T^4 - T_{\text{muro}}^4])$$

En cada instante de tiempo se calcula la temperatura media de la capa de humos (T_m) y la velocidad del frente de humos se obtiene sumando la velocidad del aire en el interior del túnel (W) y la que provoca la corriente de gravedad W_g :

$$W_g = 0.67 \sqrt{g D_h \frac{T_m - T_{\text{ref}}}{2 \cdot T_m}}$$

La distribución de los contaminantes que provoca el incendio se evalúa mediante la ecuación de difusión-convección:

$$\frac{\partial c(t)}{\partial t} = W(t) \frac{\partial c(t)}{\partial x} + q + D \frac{\partial^2 c(t)}{\partial x^2}$$

ventilación longitudinal

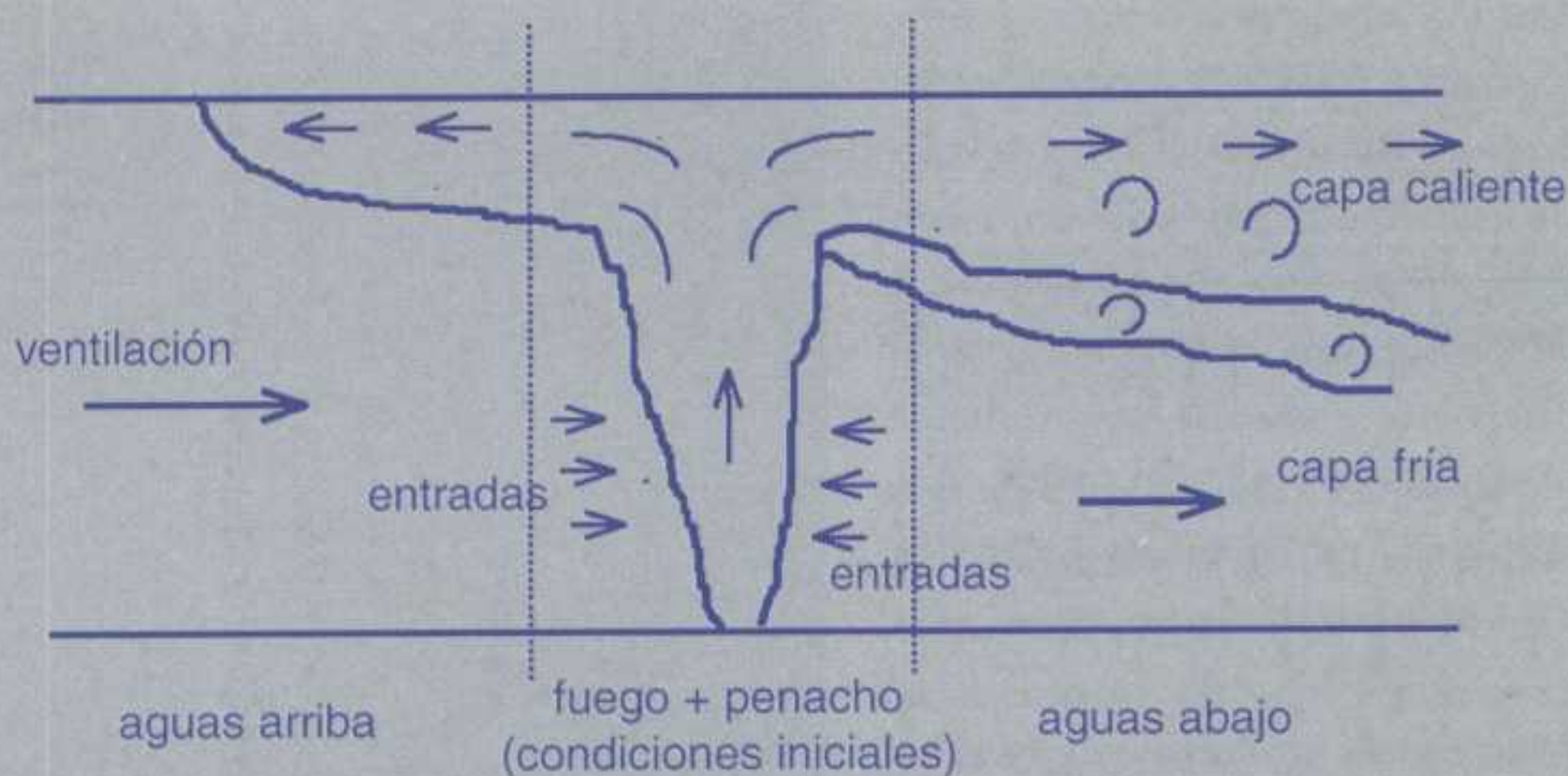
El modelo unidimensional es apropiado para realizar estudios a nivel global donde se acepta que la temperatura, composición de los gases y otras magnitudes son lo suficientemente uniformes en secciones transversales al túnel. Obviamente esto no ocurre cerca de un incendio.

Modelos Tridimensionales

En el suelo hay un vehículo u otro objeto que arde y del que se eleva una llama seguida de un penacho de gases calientes. La capa caliente prosigue su movimiento fundamentalmente hacia aguas abajo hasta que, a una distancia suficientemente grande, el aire caliente ocupa toda la sección del túnel.

Aguas abajo de esta distancia y aguas arriba de la posición del punto de remanso, podría suponerse que el modelo unidimensional es válido.

Este tipo de modelización tridimensional, que trata de dar distribuciones de las distintas magnitudes (temperatura, presión, velocidad, composición, etc) en todo instante y en todo el campo del incendio, es complejo y difícil de implementar con carácter general, y requiere una capacidad de cálculo y tiempo de ordenador descomunal; por ello se tiende a desarrollar modelos más simples del denominado tipo compartimental o zonal, que ha sido aplicado a la simulación de fuegos en habitaciones o edificios, aunque muy escasamente en túneles.



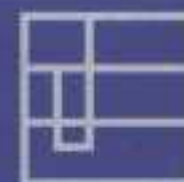
Un esquema del flujo en esa región está esbozado en la Figura 1.

Modelo Zonal o de Compartimentación

Los modelos zonales en lugar de dar el detalle de lo que ocurre en cada punto, dividen el dominio en diferentes zonas o compartimentos, y dan propiedades medias de las magnitudes en cada una de ellas, o presuponen variaciones de acuerdo con reglas fijadas a priori, basadas en la experimentación o en argumentos físicos.

Cada uno de los elementos antes mencionados: objeto que arde, llama, penacho, capa caliente, paredes del túnel, capa fría inferior, zona de recirculación y regiones de entrada y salida, se supone que son las zonas o módulos en que se divide el fuego, la variación de cuyas propiedades está relacionada con los intercambios de masa, cantidad de movimiento y energía con las zonas circundantes. Aunque el modelo zonal es mucho más sencillo que el tridimensional, el número de ecuaciones a resolver puede ser muy elevado, dependiendo del número de zonas y de magnitudes que describen cada una de ellas.

Estos dos últimos modelos trabajan con un gran número de variables, lo que genera un volumen inmenso de resultados y dificulta la realización de estudios paramétricos, por lo que sólo se utiliza en regiones locales de especial interés. Así mismo, los detalles pueden resultar irreales debido a la incertidumbre de las variables que participan en el fenómeno.



EJEMPLOS

A continuación se presentan distintos ejemplos desarrollados en los que se emplean los modelos expuestos anteriormente.

Para los modelos unidimensionales se muestran distintos tipos de resultados obtenidos (gráficas de velocidades y concentración de humos) pero se hace especial hincapié en los beneficios de este tipo de estudios a la hora de establecer las pautas de actuación que regirán el comportamiento del equipo de control en las situaciones de interrupción de calzada con fuego. Los análisis realizados para los modelos tridimensionales permiten comprender mejor el comportamiento local del incendio mostrando las limitaciones del modelo unidimensional y haciendo posible un uso más eficiente del mismo.

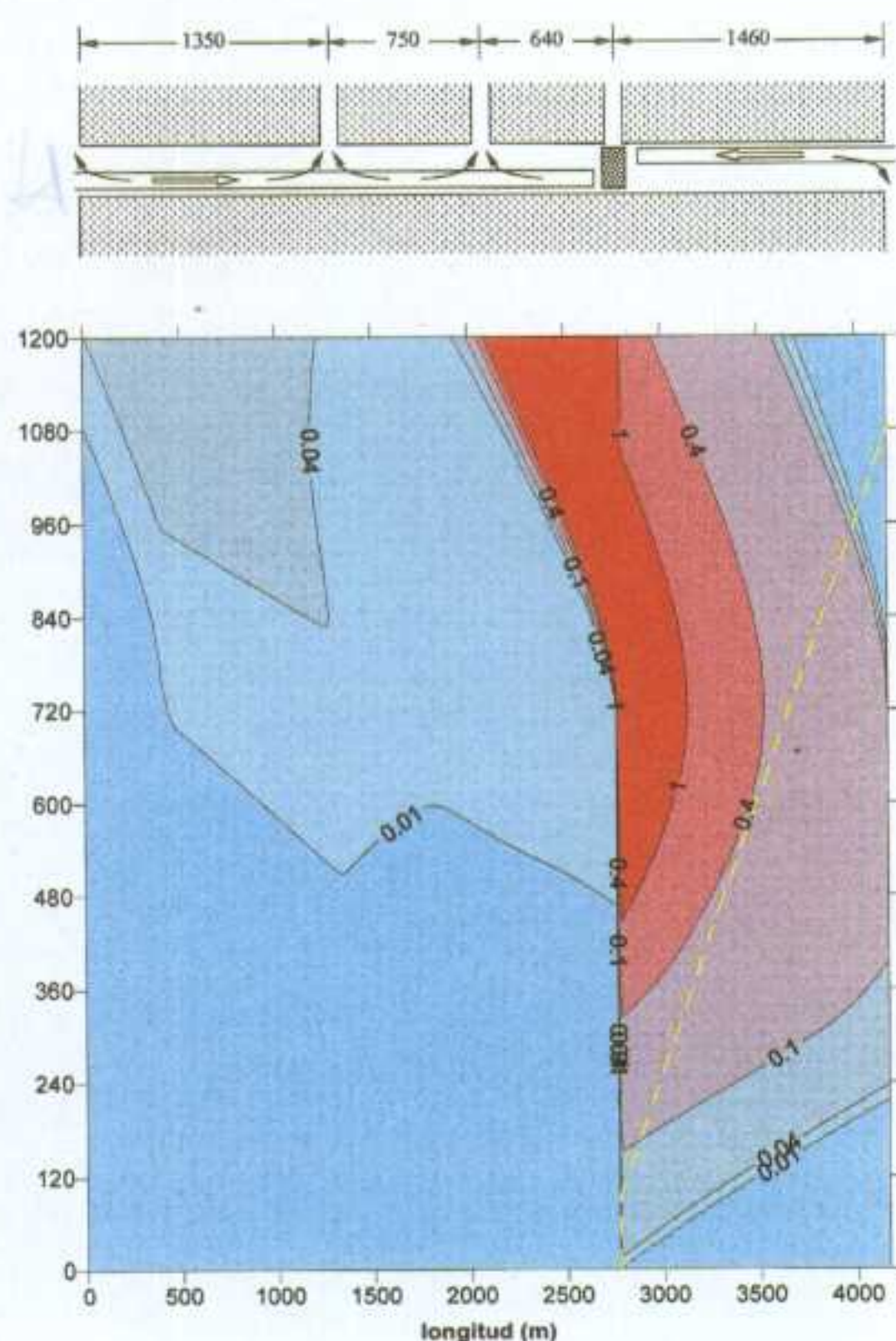
Los modelos presentados corresponden al túnel de El NEGRÓN II. Se trata de un túnel de dos carriles proyectado para un único sentido de circulación aunque se ha previsto una situación de emergencia en la que los vehículos circulan en los dos sentidos por cierre del túnel paralelo (accidente, mantenimiento, etc). Su elevada longitud (4200 m) y la existencia del anterior paralelo aconsejan la utilización de galerías de comunicación que puedan ser utilizadas como vías de escape ante situaciones de riesgo.

EL NEGRÓN II

Los modelos presentados corresponden al túnel de El Negrón II

En este caso se representa un escenario pésimo de accidente con fuego, en el que existe una situación extraordinaria con tráfico bidireccional y además la posición del incendio bloquea una de las vías de escape con el túnel adyacente. Los usuarios, por tanto, tendrán que recorrer mayores distancias para huir de la zona. Inicialmente existen dos ventiladores actuando en el sentido Sur-Norte mientras que el tiro natural tiene sentido contrario. Como medida urgente de actuación se interrumpe la acción de los dos ventiladores permitiendo que el propio tiro natural invierta el sentido en el del aire interior.

Figura 3. Coeficiente de extinción

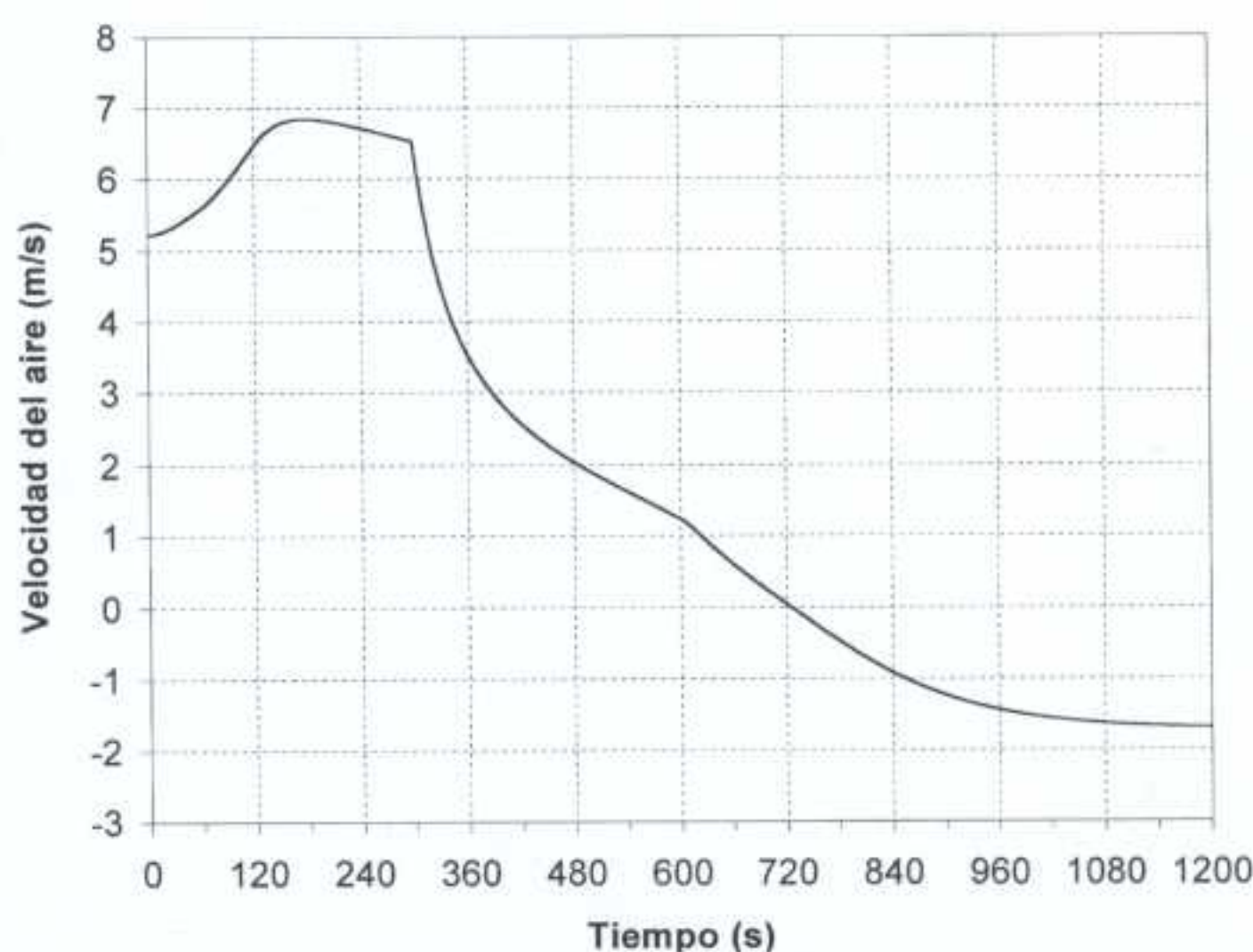


En la Figura 3 se pueden apreciar los niveles de concentración de humos y CO sufridos en la trayectoria hasta el escape. La trayectoria representa una velocidad 1.4 m/s. Durante este tiempo la trayectoria no corta la isótopa de coeficiente de extinción admisible de valor 0.4 m⁻¹ (línea engrosada en la figura) por lo que se considera que la actuación es suficiente.

Se muestran 2 tipos de gráficas

La primera presenta la evolución de la velocidad del aire de ventilación en el interior del túnel una vez realizada la actuación correspondiente.

Figura 2. Velocidad aire ventilación



La segunda recoge la peligrosidad de la situación para un pasajero en gráficos de isótopas de niveles de concentración de CO y humos. En ella, el eje horizontal es la variable espacial a lo largo de la longitud del túnel y el vertical es la escala de tiempo. Las isótopas dibujadas permiten establecer para cualquier instante la concentración de humos o CO a lo largo del túnel. Es posible apreciar también las trayectorias de escape de los pasajeros bien hacia las bocas o hacia las salidas de comunicación laterales.

Como se puede ver en la Figura 2 la velocidad comienza a aumentar debido a la parada de los vehículos que inicialmente se oponen a la ventilación, para después caer al conectar los equipos de ventilación longitudinal, hasta conseguirse la inversión del sentido de la masa de aire en el interior del túnel.

La experiencia acumulada al escoger un conjunto de escenarios y particularizar para cada uno de ellos la actuación óptima sobre los equipos, permite desarrollar una línea de actuación genérica, como la mostrada en la tabla 1 para el túnel de los Yébenes.

Tráfico	Situación Previa	Velocidad Aire Ventilación		Actuaciones (Ventiladores)
N → S	Con ventiladores	N → S		Desconectar
		N ← S		6N → S
	Sin ventiladores	N → S	V _a < 2.5	2N ← S
			V _a > 2.5	6N ← S
		N ← S		6N → S
N ↔ S	Con ventiladores	N → S		Desconectar
		N → S		Desconectar
	Sin ventiladores	N → S	V _a < 2	2N ← S
			V _a > 2	6N ← S
		N ← S	V _a < 2	2N → S
			V _a > 2	6N → S
N ← S	Con ventiladores	N → S		6N ← S
		N ← S		Desconectar
	Sin ventiladores	N → S		6N ← S
		N ← S	V _a < 2.5	2N → S
			V _a > 2.5	6N → S

Tabla1. Pautas de actuación

En la tabla se aprecia la forma de actuación ante diferentes situaciones del tráfico (equilibrado o con sentido preferente) medido mediante la colocación de espiras, de los ventiladores (inicialmente conectados o túnel autoventilado) y, de la velocidad inicial del aire en el túnel obtenida mediante la instalación de un anemómetro bidireccional.

En el siguiente ejemplo para profundizar en los fenómenos locales del incendio, utilizando el programa FIRE de AVL de acuerdo con el modelo tridimensional indicado anteriormente, se ha realizado el estudio transitorio de los primeros minutos del incendio.

El ejemplo reproduce la geometría del túnel de El Negrón del que se han discretizado una longitud de 1400 m mediante 67452 celdas. El fuego se produce en el carril derecho y tiene un área de 4x12 m.

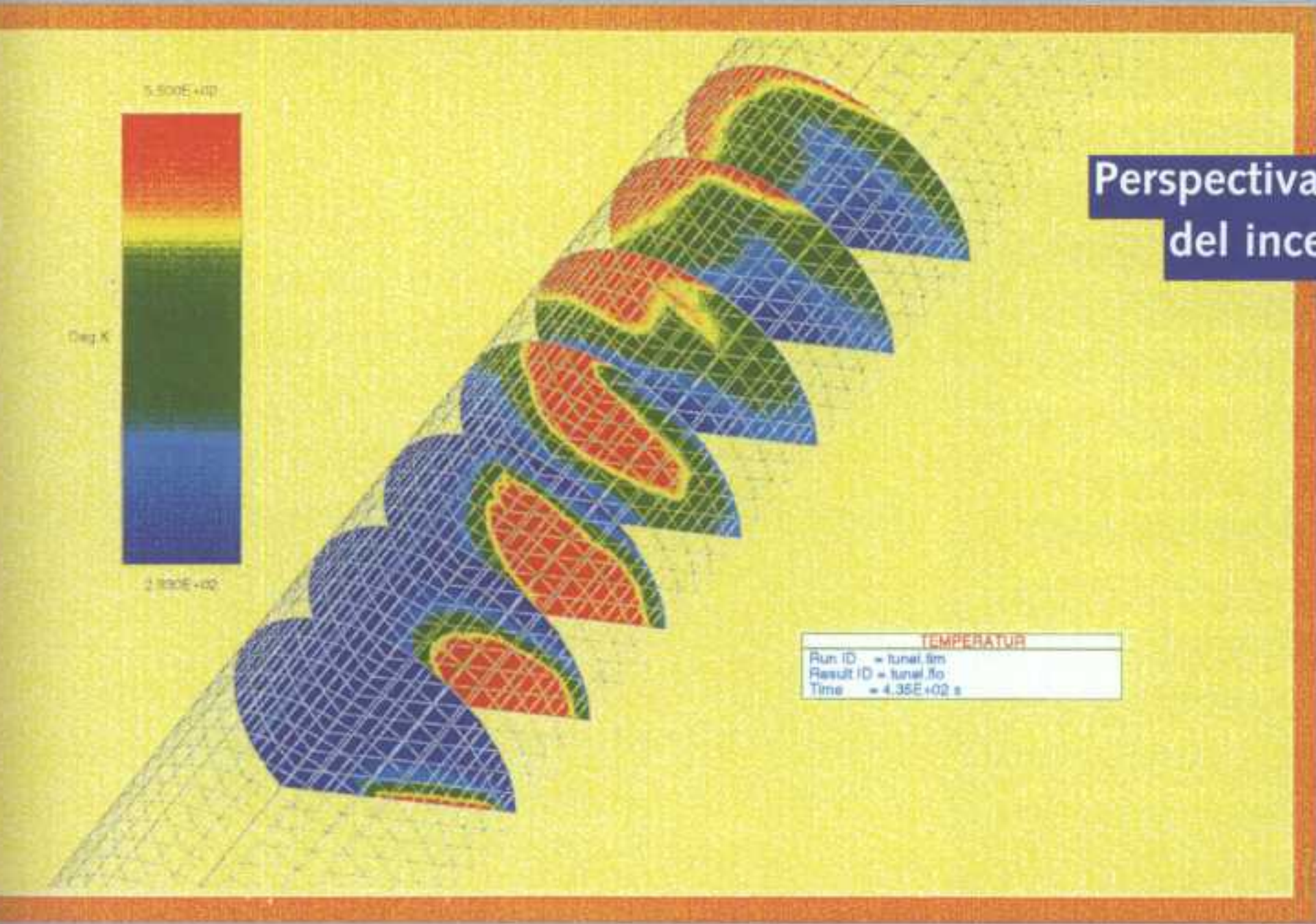


Figura 4.

Perspectiva de temperaturas en la zona del incendio 7 minutos tras su comienzo

La asimetría muestra la existencia de temperaturas elevadas en zonas bajas en la sección transversal del túnel lo que es perjudicial para la seguridad en caso de incendio. Sin embargo se corrige al alejarse de la fuente consiguiéndose la estratificación del aire.

La Figura 4 muestra una perspectiva y la Figura 5 una sección longitudinal de la evolución de las temperaturas en la zona próxima a un fuego situado en uno de los carriles al cabo de 7 minutos del inicio. En ellas se observa el efecto de arrastre longitudinal debido a la velocidad de 4 m/s y la rápida ascensión

de la columna de humo a la bóveda. La combinación de estos movimientos junto con la posición del incendio y forma curva de la bóveda provoca una curiosa asimetría del movimiento hacia el lado contrario de aquel en el que se produce el incendio.

Figura 5. Sección longitudinal de las temperaturas en la zona del incendio 7 minutos tras su comienzo



CONCLUSIONES

En túneles con ventilación longitudinal la actuación sobre los ventiladores es fundamental para evitar una catástrofe en caso de accidente con fuego. Se han presentado tres modelos de cálculo que permiten el estudio de estas situaciones.

El modelo unidimensional aparece como el de mayor simplicidad, las variables son introducidas de forma macroscópica permitiendo un análisis global del problema. Entre sus ventajas se cuentan el bajo coste operacional lo que posibilita el análisis de multitud de casos y el acoplamiento con la acción del tráfico. La realización de análisis locales requiere el uso de otros métodos de elevado coste como son los modelos zonales y tridimensionales. En general su uso es adecuado para contrastar ensayos in-situ en secciones de especial interés. La principal limitación de estos modelos radica en la dificultad de definir el modelo, en particular pueden presentar problemas la fijación de condiciones de contorno o la simulación del tráfico.

Se ha presentado en los ejemplos la actuación realizada ante una situación de incendio y tráfico bidireccional. Estos escenarios son especialmente peligrosos puesto que en ambas partes del incendio existen personas cuya seguridad puede verse afectada. Los modelos numéricos permiten el estudio de dicha seguridad con el fin de obtener pautas genéricas de actuación sobre los equipos de control. Las actuaciones además del control y aviso de los usuarios se centran en la ventilación longitudinal con el fin de dar el mayor tiempo posible al usuario en su huida. De forma genérica se persigue frenar el aire interior del túnel manteniendo la nube de contaminantes concentrada en la zona del incendio. La forma más inmediata de conseguirlo es provocar la inversión en el sentido del avance de la masa de aire, lo que se ve dificultado por la gran cantidad de condiciones iniciales que pueden presentarse.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BHRA (British Hydromechanics Research Association) Cranfield Bedford, England. "The aerodynamic and ventilation of vehicle tunnels"
2. PIARC (Permanent International Association for road Congresses). Paris. FRANCE.
3. Bōras Swedish National Testing and Research Institute, 1994. "Proceedings of the International Conference of Fires in Tunnels". Communication limited. London.
4. MOPTMA. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. 1994. "Jornadas Técnicas sobre Túneles. La Seguridad en la Construcción y en servicio".
5. Lacroix D. & Chasse P.: "Etude sur maquettes aerauliques des systemes de trappes de desenfumage en tunel routier". 1994. Centre d'etudes des tunnels. Lyon. France.
6. Mochón, L; Hernández, J; Crespo, A; Alarcón, E. "Problemas en los estudios de ventilación de túneles de carretera". Jornadas Técnicas sobre túneles. La seguridad en la construcción y en servicio. MOPTMA. Gijón, 22-24 Junio 1994, 59-122.
7. López Guarga, R. "Aspectos singulares en proyectos y obras de túneles largos de carretera". Jornadas Técnicas sobre túneles. La seguridad en la construcción y en servicio. MOPTMA. Gijón, 22-24 Junio 1994, 135-194.
8. Ministère de l'Equipement des Transport et du Logement. "Rapport d'Etape sur l'incendie au tunnel routier du Mont Blanc". France. Avril, 1999.
9. Lacroix, D. "PIARC activities on fire and smoke control in road tunnel". 8th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Liverpool, U.K., 6-8 July 1994, pp. 345-355.